

Interaction of Application Method and Rate of Phosphorus Fertilizer with Organic Matter on Inorganic Phosphorus Fractions in Pistachio-Grown Soil

Fatemeh Abbaszadeh, Naser Boroomand and Majid Hejazi-Mehrzi^{ID}

?

* Corresponding author, Email: mhejazi@uk.ac.ir

Abstract

Background and Objective: In calcareous soils of arid and semi-arid regions, knowledge of phosphorus (P) forms can be instrumental in optimizing the use of chemical fertilizers and reducing their detrimental effects on the environment. The aim of this study was to compare two methods of surface and subsurface application of different levels of triple superphosphate and organic fertilizer (manure cow) on the forms of inorganic phosphorus in the subsurface layer (30–50 cm) of the soil.

Materials and Methods: The research was conducted as a randomized complete block design in a factorial arrangement with three replications. The fertilizer treatments included four levels of triple superphosphate (0, 200, 400, and 600 kg/ha) combined with two levels of organic matter (0 and 30 ton/ha), which were applied at two depths—surface (0–20 cm) and subsurface (30–50 cm) for four years under field conditions. At the end of the fourth year of fertilization, soil samples were taken from the 30–50 cm depth.

Results: Inorganic phosphorus forms were determined using the sequential extraction method, and available phosphorus was measured by the Olsen method. The results showed that in both fertilizer application methods, with and without organic matter, the phosphorus fractions increased with increasing fertilizer levels. Application of 600 kg/ha triple superphosphate (TSP) notably increased available phosphorus in fertilizer surface (41%) and subsurface (42%) application. The results also indicated that in the 30–50 cm soil layer, only subsurface application caused a significant increase in labile phosphorus forms, including water-extractable P (by 70.4%) and NaHCO₃-extractable P (by 78.3%) compared to the control. In contrast, at this sampling depth, surface application of TSP led to an increase in moderately labile and non-labile P forms in the soil.

Conclusion: The results of this study demonstrated that the fertilizer application method and knowledge of inorganic phosphorus fractions can provide a valuable tool for determining phosphorus availability for pistachio plants.

Keywords: Organic matter, P Availability, Pi fractionation, Saline calcareous soil, surface and sub-surface application.

برهمکنش روش و میزان کاربرد کود فسفره با ماده آلی بر شکل‌های شیمیایی فسفر معدنی در خاک تحت کشت پسته

فاطمه عباس‌زاده، ناصر برومند و مجید حجازی مهریزی*

گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان
* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: mhejazi@uk.ac.ir

چکیده

پیشینه پژوهش و هدف: در خاک‌های آهکی مناطق خشک و نیمه خشک، آگاهی از شکل‌های فسفر می‌تواند در بهینه‌سازی مصرف کودهای شیمیایی و کاهش اثرات مخرب آن‌ها بر محیط زیست راهگشا باشد. هدف از این مطالعه مقایسه دو روش کاربرد سطحی و جایگذاری عمقی سطوح مختلف سوپرفسفات تریپل و کود آلی (کود گاوی) بر شکل‌های فسفر معدنی در لایه زیر سطحی (۵۰-۳۰ سانتی‌متری) خاک می‌باشد. **مواد و روش‌ها:** پژوهشی در قالب طرح بلوک کاملاً تصادفی به صورت فاکتوریل و با سه تکرار انجام شد. تیمارهای کودی شامل چهار سطح کود سوپرفسفات تریپل (۰، ۲۰۰، ۴۰۰ و ۶۰۰ کیلوگرم در هکتار) همراه با دو سطح ماده آلی (۰ و ۳۰ تن در هکتار) بود که در دو عمق سطحی (۲۰-۰ سانتی‌متری) و زیر سطحی (۵۰-۳۰ سانتی‌متری) به مدت چهار سال در شرایط مزرعه جایگذاری شدند. در پایان سال چهارم کوددهی، نمونه‌های خاک از عمق ۵۰-۳۰ سانتی‌متری برداشت و گونه‌های فسفر معدنی با استفاده از روش عصاره‌گیری متوالی، و فسفر قابل استفاده با روش عصاره‌گیری با بیکربنات سدیم تعیین شدند.

نتایج: نتایج نشان داد با افزایش سطح کودی میزان فسفر قابل استفاده در هر دو سطح کاربرد کودی افزایش داشت، بیشترین میزان فسفر قابل استفاده نسبت به شاهد در تیمار ۶۰۰ کیلوگرم در هکتار همراه با ماده آلی در هر دو عمق کاربرد سطحی (۴۱٪) و عمقی (۴۲٪) مشاهده شد. همچنین نتایج نشان داد که در عمق ۳۰ تا ۵۰ سانتی‌متری خاک، کاربرد عمقی کود سبب افزایش شکل‌های قابل دسترس فسفر خاک شامل فسفر قابل استخراج با آب (۷۰/۴٪) و فسفر قابل استخراج با بیکربنات سدیم (۷۸/۳٪) در مقایسه با شاهد شد. در مقابل در عمق ۵۰-۳۰ سانتی‌متری، کاربرد سطحی سوپرفسفات تریپل سبب افزایش شکل‌های نسبتاً در دسترس و غیر قابل دسترس فسفر در خاک شد. **نتیجه‌گیری کلی:** نتایج این تحقیق نشان داد، روش کاربرد کود و اطلاع از اجزای فسفر معدنی می‌تواند ابزار ارزشمندی در تعیین قابلیت دسترسی فسفر برای گیاه پسته را فراهم کند.

واژه‌های کلیدی: جزءبندی فسفر معدنی، کاربرد سطحی و زیر سطحی، خاک آهکی، ماده آلی، فراهمی فسفر.

یکی از عناصر ضروری برای هر سلول گیاهی فسفر می باشد که در فرآیندهای فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی گیاه نقش حیاتی دارد. غلظت این عنصر در خاک بسیار کم بوده و تحرک کمی در مقایسه با دیگر ترکیبات و عناصر غذایی مثل نیترات و پتاسیم دارد. فسفر پس از نیتروژن مهم ترین عنصر برای رشد گیاهان می باشد (Mou et al., 2020) که امنیت جهانی غذا به آن وابسته است (Chen and Greadel, 2016).

بیش از ۸۷ درصد از خاک های زراعی ایران را خاک های آهکی تشکیل می دهند که به طور طبیعی در مناطق خشک و نیمه - خشک تشکیل می شوند. اراضی کشاورزی در این مناطق به طور عمده با چالش هایی نظیر شوری بالا، فقر ماده آلی و عناصر غذایی، آهک زیاد و pH بالا مواجه می باشد (Shahbazi and Besharati, 2013). یکی از محدودیت های عمده رشد گیاهان در این خاک ها، قابلیت دسترسی فسفر می باشد چرا که به دلیل وجود یون کلسیم و کانی کربنات کلسیم در خاک های آهکی، فسفر تثبیت شده و قابلیت دسترسی آن برای گیاه کاهش می یابد. هرچه فعالیت یون کلسیم در محلول بیشتر باشد میزان کربنات کلسیم بالاتر خواهد بود و به واسطه وجود رس های ۲:۱ در خاک، مقدار فسفر بیشتری تثبیت می شود (Salardini, 2009). در خاک های این مناطق جهت جبران کمبود فسفر مورد نیاز پسته و افزایش عملکرد، سالانه مقادیر بالاتر کودهای شیمیایی فسفره توسط کشاورزان استفاده می شود که منجر به تجمع فسفر در خاک و افزایش فسفر کل در خاک شده است. علی رغم بالا بودن فسفر کل در این خاک ها، اما کاربرد بلند مدت کودهای فسفره و کارایی پایین آن ها، کمی مواد آلی و خشکی خاک، وجود pH بالا و کربنات کلسیم بالا (Adnan, 2025) سبب شده است که مقدار جذب فسفر، کمتر از مقدار لازم برای تأمین رشد بهینه گیاه باشد. بر طبق مطالعات انجام شده در خاک های اسیدی و آهکی به دلیل واکنش های فسفر با اجزای خاک، کمتر از ۲۰ درصد کود فسفره مصرفی توسط گیاه برداشت می شود و مابقی به صورت تثبیت و به شکل غیر قابل جذب در خاک در می آید (Gatiboni et al.,

روش کوددهی نیز نقش مهمی در کارایی مصرف کود و آب، تلفات کود و عملکرد گیاه ایفا می کند. (Mohseni et al. 2013) با مقایسه دو روش کوددهی سطحی و کود آبیاری بر عملکرد ذرت بیان داشتند که عملکرد ذرت در اکثر تیمارهای کود آبیاری نسبت به روش پخش سطحی با یکدیگر اختلاف معنی داری داشته و بیشترین تلفات عمقی نیترات در تیمار پخش سطحی بوده که ۱/۲۵ درصد بیش تر از روش کود آبیاری می باشد. همچنین Heidari et al. (2017) نیز در بررسی دو روش پخش سطحی و نواری کود فسفاته بر عملکرد ذرت بیان داشتند عملکرد دانه در جای غذای نواری کود (۱۰۸۶۲ کیلوگرم در هکتار) نسبت به استفاده سطحی از کود (۹۹۶۵ کیلوگرم در هکتار) بیشتر بوده است.

از آنجایی که بخش وسیعی از اراضی شمال غربی استان کرمان تحت کشت پسته می باشد و هر ساله علی رغم استفاده قابل توجهی کود فسفره، اما افزایش عملکرد قابل توجهی در باغات پسته مشاهده نمی شود، لذا هدف از این پژوهش بررسی نحوه کاربرد سوپرفسفات تریپل بر شکل های فسفر معدنی در لایه زیر سطحی خاک به عنوان بخشی که ریشه های فعال در آن قرار دارند می باشد. در این پژوهش فرض شده که روش کاربرد کود می تواند بر دسترسی اجزای فسفر معدنی و همچنین قابلیت دسترسی فسفر موثر باشد. آگاهی از نحوه کاربرد کود بر شکل های فسفر معدنی می تواند در راستای مدیریت بهینه و پایدار کودهای فسفره در منطقه راهگشا باشد.

مواد و روش ها

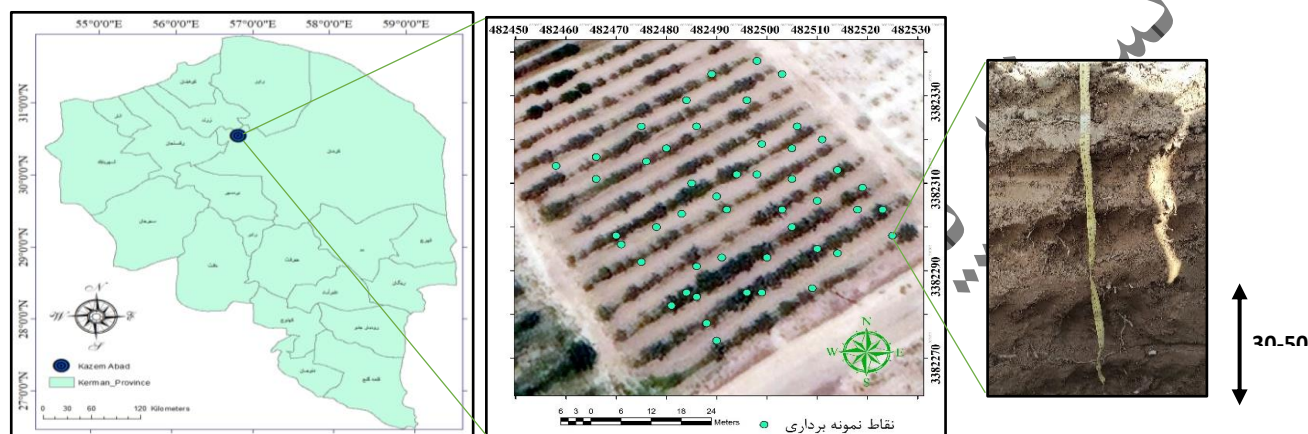
منطقه مطالعاتی، نمونه برداری و تجزیه خاک

نمونه برداری از خاک یکی از باغات پسته منطقه کاظم آباد (30°34'23"N to 56°49'44"E) که دارای سابقه کوددهی مشخص می باشد انجام پذیرفت. نحوه اعمال تیمارهای کودی در این باغ نمونه که متوسط سن درختان پسته (رقم اوحدی) ۳۰ سال می باشد به صورت سالانه و تا چهار سال در فصل زمستان

جدول ۲. نتایج آنالیز کود آلی (گاوی) مورد استفاده

Table 2. the manure fertilizer analysis

P total (mg/kg ⁻¹)	C/H (%)	C/N (%)	O (%)	H (%)	C (%)	N (%)	EC (dS.m ⁻¹)	pH
1010	5.39	9.44	43	4.2	22.67	2.4	2.12	7.6



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه و پراکنش نقاط نمونه برداری

Fig 1. Geographical location of study area and soil samples distribution

با روش‌های استاندارد آزمایشگاهی اندازه‌گیری شد که در جدول (۱) آورده شده است. همچنین فسفر قابل جذب نیز با عصاره‌گیر و روش استاندارد آزمایشگاهی (Sparks, 1996) استخراج و با استفاده از روش رنگ‌سنجی آبی مقدار فسفر تعیین شد.

جهت جداسازی و تعیین شکل‌های فسفر معدنی از روش استخراج متوالی (Hedley et al., 1982) اصلاح شده توسط Sui et al. (1999) استفاده شد. جهت تعیین اجزای فسفر معدنی به یک گرم از نمونه‌های خاک به‌طور متوالی ۳۰ میلی‌لیتر آب مقطر، بیکربنات سدیم نیم مولار^۲، سدیم هیدروکسید ۶/۱ مولار^۳، اسید کلریدریک یک مولار^۴ و مخلوط اسید سولفوریک (۹۸٪) و آب اکسیژنه (۳۰٪)^۵ اضافه شد. نمونه‌ها به مدت ۱۶ ساعت شیک و به مدت ۵ دقیقه سانتریفیوژ (۳۰۰۰ دور در دقیقه) شدند. در نهایت با عبور از کاغذ صافی، فسفر موجود در عصاره‌ها با روش رنگ‌سنجی (Murphy and Riley, 1962) تعیین شدند. قرائت‌ها

(اواخر بهمن ماه) شامل کود سوپر فسفات تریپل و ماده آلی (کود گاوی) (جدول ۲) بود. سطوح مختلف کود سوپر فسفات تریپل شامل چهار سطح ۰، ۲۰۰، ۴۰۰ و ۶۰۰ کیلوگرم در هکتار همراه با دو سطح کود آلی (صفر و ۳۰ تن در هکتار) بود که به دو صورت سطحی (۲۰-۰ سانتی‌متری) و عمقی در منطقه توسعه ریشه (۵۰-۳۰ سانتی‌متری) اعمال شد. نمونه‌برداری از خاک درختانی در حد امکان یک دست (از نظر رقم، سن، و شرایط رشدی) انجام شد. نحوه انجام نمونه‌برداری به‌صورت سیستماتیک و در سه تکرار می‌باشد. نمونه‌ها از عمق ۵۰-۳۰ سانتی‌متری و در مجموع ۴۸ نمونه خاک، از دو طرف درخت پسته و از محل سایه‌انداز درخت برداشت شد (شکل ۱).

نمونه‌های برداشت شده در دمای محیط هوا خشک و پس از انتقال به آزمایشگاه از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شدند. برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های منطقه مورد مطالعه

4- HCl-P
5- Residual-P

1- H₂O-P
2- NaHCO₃-P
3- NaOH-P

جدول ۱. برخی از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک پسته در عمق ۵۰-۳۰ سانتی متری

Table 1: Physical and chemical properties of Pistachio soil in 30-50 cm soil layer

ویژگی های خاک	روش اندازه گیری	مقدار
Soil properties	Measurement method	Value
Soil texture		Sandy loam
Sand (%)	Hydrometer (Bouyoucos, 1962)	63.51
Silt (%)		26.23
Clay (%)		10.26
Soil bulk density (g/cm ³)	(Grossman et al, 2002)	1.6
pH (1:5)	pH meter (Thomas, 1996)	7.3
EC (dS/m) (1:5)	EC meter (Roades, 1996)	4.4
Organic matter (%)	(Walkley et al, 1934)	0.78
CaCO ₃ (%)	(Shahbazi, 2020 a)	27.9
Available P (mg/ Kg)	Spectrophotometer (Sparks, 1996)	10.4

استخراج با بیکربنات سدیم)، فسفر نسبتاً در دسترس (فسفر قابل استخراج با سود) و فسفر غیر قابل دسترس (فسفر قابل استخراج با اسید و فسفر باقیمانده) تقسیم بندی شد. این تقسیم بندی بر اساس مطالعات Mao et al. (2023) انجام شده است.

نتایج نشان داد که در شرایط استفاده عمقی و سطحی کود و همچنین کاربرد و عدم کاربرد ماده آلی، فسفر قابل استخراج با آب به طور معنی داری با افزایش سطح کودی افزایش می یابد (شکل ۲). اما این افزایش در کاربرد عمقی کود بیشتر از کاربرد سطحی مشاهده شد. به طوری که کاربرد ۶۰۰ کیلوگرم در هکتار سوپر فسفات تریپل به همراه ماده آلی میزان فسفر قابل استخراج با آب را نسبت به تیمار بدون کود ۷۰/۴ درصد افزایش یافت (شکل ۲). این افزایش برای استفاده سطحی کود در این تیمار، ۴۴/۱ درصد نسبت به شاهد مشاهده شد. در هر دو عمق کاربرد کود، استفاده از ماده آلی سبب افزایش معنی دار فسفر قابل استخراج با آب شد (شکل ۲). Zhang et al. (2004) گزارش کردند که با افزودن مقادیر ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ تن در هکتار کمپوست، فسفر محلول در آب نسبت به شاهد افزایش معنی داری نشان می دهد.

فسفر قابل استخراج با بیکربنات سدیم نیز روندی مشابه با فسفر قابل استخراج با آب نشان داد و بر طبق نتایج جدول تجزیه واریانس به طور معنی داری تحت تاثیر اثرات اصلی سطح و عمق

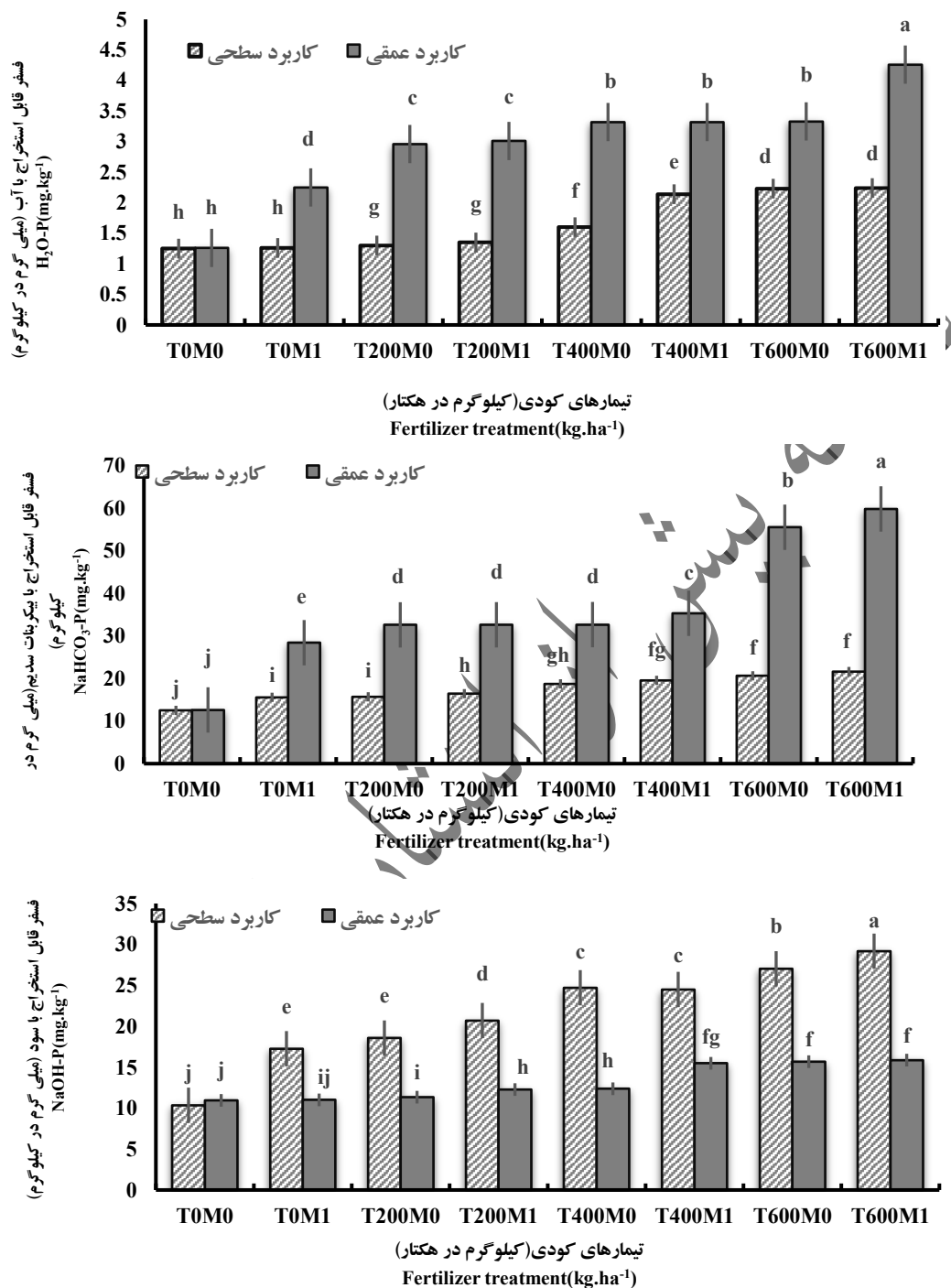
در طول موج ۸۸۰ نانومتر با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر مدل CECIL, SERIES 2 انجام شد.

تجزیه آماری

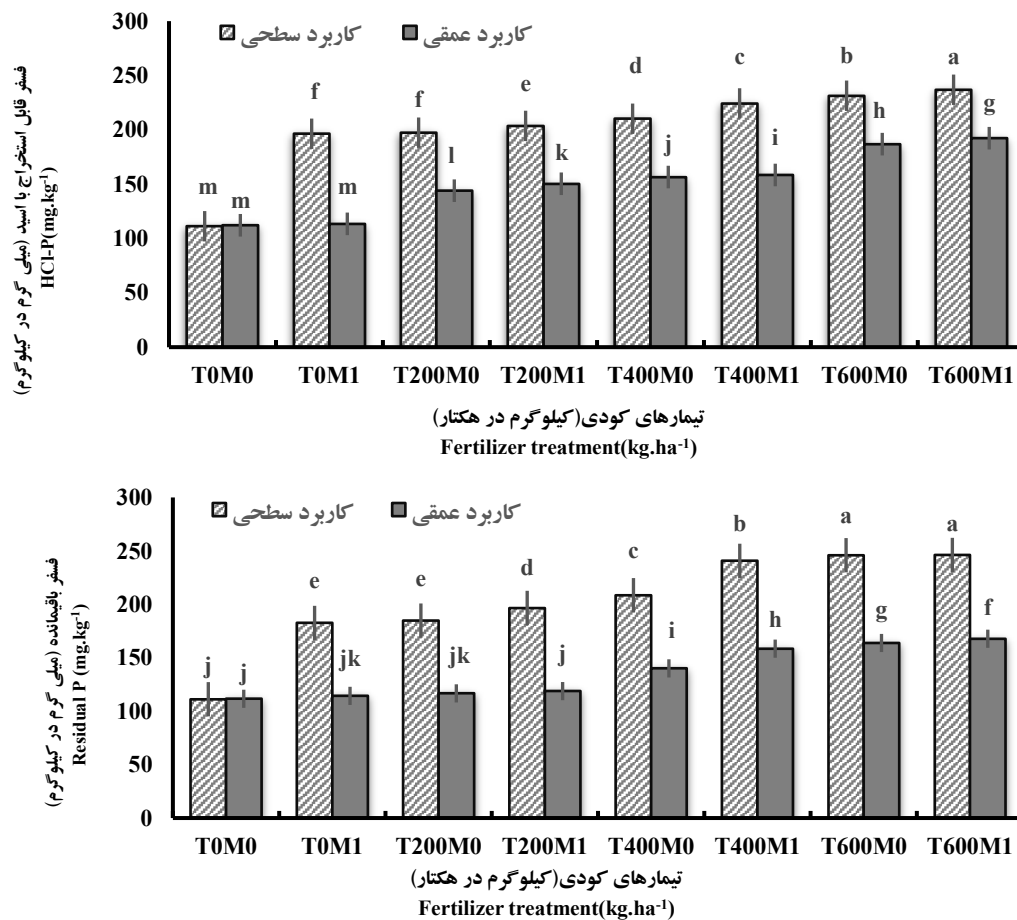
این مطالعه در قالب طرح بلوک های کاملاً تصادفی به صورت فاکتوریل انجام شد و اثرات متقابل سطوح کودی، ماده آلی و عمق کاربرد کود بر اجزای فسفر خاک مورد بررسی قرار گرفت. قبل از تجزیه واریانس داده ها، همگنی و نرمال بودن هر یک از ویژگی ها با استفاده از آزمون کولموگراف-اسمیرنوف بررسی شد. تجزیه واریانس با استفاده از مدل آنالیز چند متغیره در نرم افزار SAS 9.4 انجام گرفت. همچنین مقایسه میانگین شکل های فسفر در سطح احتمال پنج درصد ($p < 0.05$) با استفاده از آزمون LSD انجام پذیرفت و نمودارها در Excel ترسیم شدند.

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اجزای فسفر معدنی تحت تاثیر اثرات اصلی سطح کاربرد کود، ماده آلی، عمق کاربرد کود و اثرات متقابل آن ها قرار گرفت (جدول ۳). برای ارائه راحت تر نتایج و ساده تر شدن تغییرات شکل های فسفر، اجزای فسفر معدنی در سه بخش قابل دسترس (فسفر قابل استخراج با آب و فسفر قابل



شکل ۲. مقایسه دو عمق کاربرد کودی (سطحی و عمقی) بر اجزای فسفر معدنی در کاربرد سطوح مختلف کودی
T0: سطح کودی صفر، T200: سطح کودی ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار، T400: سطح کودی ۴۰۰ کیلوگرم در هکتار، T600: سطح کودی ۶۰۰ کیلوگرم در هکتار، M0: بدون ماده آلی، M1: دارای ماده آلی
(حروف متفاوت روی هر ستون، نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار تیمارها در سطح ۵ درصد آزمون LSD می‌باشد)
Fig 2. Comparative of fertilizer application depth (surface and deep) on P fractions in fertilizer different levels
T0: no fertilizer, T200: 200 kg superphosphate triple in hectare, T400: 400 kg superphosphate triple in hectare, T600: 600 kg superphosphate triple in hectare.
(Bars with similar letters are not significantly different (LSD, $p < 0.05$)).



ادامه شکل ۲.
Fig 2. (Continued)

فسفر معدنی به ویژه دی‌کلسیم فسفات، اکتا کلسیم فسفات را افزایش داد و همچنین سبب افزایش راندمان جذب فسفر نیز شده است.

فسفر قابل استخراج با سود (نسبتاً قابل دسترس) روند متفاوتی نسبت به اجزای قابل دسترس (فسفر قابل استخراج با آب و بی‌کربنات سدیم) نشان داد. نتایج نشان داد که در هر دو عمق کاربرد کود، در شرایط کاربرد و عدم کاربرد ماده آلی، با افزایش سطح کودی به ۶۰۰ کیلوگرم در هکتار سبب افزایش معنی‌دار فسفر قابل استخراج با سود نسبت به تیمار بدون کود و ماده آلی شد (جدول ۳). درحالی‌که کاربرد سطحی کود، تفاوت معنی‌داری در مقدار NaOH-P در تیمار ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار در شرایط کاربرد و عدم کاربرد ماده آلی مشاهده نشان نداد اما

کاربرد کود، ماده آلی و اثرات متقابل آن‌ها قرار گرفت (جدول ۲). همچنین نتایج نشان‌دهنده تأثیر افزایش سطح کاربرد کود بر افزایش فسفر قابل استخراج با بی‌کربنات سدیم در شرایط کاربرد و عدم کاربرد ماده آلی در دو عمق کاربرد کود دارد. نتایج بیانگر افزایش فسفر قابل استخراج با بی‌کربنات سدیم در کاربرد عمقی نسبت به کاربرد سطحی داشت. به‌طوری‌که بیشترین میزان $\text{NaHCO}_3\text{-P}$ در سطح ۶۰۰ کیلوگرم در هکتار سوپر فسفات تریپل همراه با ماده آل با مقدار ۶۰ میلی‌گرم در کیلوگرم دیده شد. کاربرد کودهای آلی در تمامی سطوح کود سوپر فسفات تریپل به جز سطح ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار سبب افزایش معنی‌داری در میزان فسفر قابل استخراج با سدیم شد (شکل ۲). Liu et al. (2023) بیان داشتند که کاربرد عمقی کود فسفر، اجزای

Table 3: variance analysis of P fractions in fertilizer surface and deep application

* and ns indicate significant and non- significant effect at 5% probability level, respectively.

مقدار فسفر قابل استخراج با بی‌کربنات سدیم در شرایط کاربرد و عدم کاربرد ماده آلی در هکتار تیمار کودی افزایش یافت. بیشترین میزان فسفر قابل استخراج با سود در تیمار ۶۰۰ کیلوگرم همراه با ماده آلی با مقدار ۲۹/۱ میلی‌گرم در کیلوگرم مشاهده شد که میزان NaOH-P نسبت به تیمار بدون کود و ماده آلی ۶۲/۴ درصد افزایش داد. درحالی‌که برای کاربرد عمقی این عدد برای تیمار ذکر شده ۳۵/۴ درصد بود (شکل ۲).

اضافه شدن کودهای آلی به تمامی سطوح سوپر فسفات تریپل نیز میزان فسفر قابل استخراج با سود را در هر دو عمق کاربرد کود افزایش داد. آزاد شدن برخی از عناصر از جمله آلومینیوم از کود در اثر کاهش pH و همچنین بالا بودن غلظت فسفر در ناحیه اطراف کود سبب افزایش کانی‌های فسفات آلومینیوم (Hooker et al., 1980; Sample, 1980) در نتیجه افزایش در مقدار NaOH-P می‌شود.

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که فسفر قابل استخراج با اسید تحت تاثیر اثرات اصلی سطح کاربرد کود، ماده آلی، عمق کاربرد و اثرات متقابل آن‌ها قرار گرفت (جدول ۳). نتایج نشان داد در

فسفر قابل استفاده

فسفر السن شاخص مهمی از فسفر قابل دسترس خاک است (Sun et al., 2022). این فسفر نشانگر خوبی برای در دسترس بودن فسفر در خاک‌های آهکی با pH بالا محسوب می‌شود. نتایج تجزیه واریانس نشان داد که فسفر قابل استفاده تحت تأثیر اثرات متقابل سطح کاربرد کود، ماده آلی و عمق کاربرد کود قرار گرفت. همچنین نتایج نشان داد که کاربرد عمقی و سطحی کود تأثیر معنی‌داری بر فسفر قابل استفاده نداشت (جدول ۴). با افزایش سطح کودی میزان فسفر قابل استفاده در هر دو سطح کاربرد کودی افزایش داشت به‌طوری‌که بیشترین میزان فسفر قابل استفاده نسبت به شاهد در تیمار ۶۰۰ کیلوگرم در هکتار همراه با ماده آلی در هر دو عمق کاربرد سطحی (۴۱٪) و عمقی (۴۲٪) مشاهده شد (شکل ۳). Liu et al. (2023) بیان داشتند که استفاده سطحی از کود میزان فسفر قابل دسترس را در لایه ۰-۸ سانتی‌متری بالای خاک افزایش می‌دهد اگرچه که تفاوت معنی‌داری بین فسفر قابل دسترس در عمق ۸-۲۸ سانتی‌متری خاک در حالت کوددهی سطحی و عدم کوددهی مشاهده نکردند. همچنین نتایج نشان داد که به غیر از سطح ۶۰۰ کیلوگرم در هکتار سوپر فسفات تریپل در سایر سطوح کود فسفره کاربرد ماده آلی تغییر معنی‌داری در فسفر قابل استفاده خاک نداشت. در سطح ۶۰۰ کیلوگرم در هکتار، در هر دو کاربرد سطحی و عمقی کاربرد ماده آلی سبب افزایش معنی‌دار فسفر قابل استفاده شد. کاهش در میزان pH و افزایش حلالیت فسفات‌های کلسیم در اثر افزودن کود آلی می‌تواند از دلایل افزایش فسفر قابل دسترس خاک دانست (Hao et al., 2008). Sun et al. (2023) با مطالعه بر روی خاک سرخ چین در کشت متناوب ذرت و گندم بیان داشتند که بعد از گذشت ۲۸ سال در استفاده از کودهای شیمیایی و کود شیمیایی همراه با کاه و کلش، به‌ازای هر ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار کود اضافه شده، میزان فسفر السن به‌ترتیب ۵/۹ و ۶/۷ میلی‌گرم در کیلوگرم افزایش یافت.

سبب تبدیل شدن آن به شکل‌های غیرقابل دسترس در باغات پسته می‌شود و با افزودن ماده آلی به خاک می‌توان فسفر را بدون افزودن منبع جدید در خاک تأمین کرد.

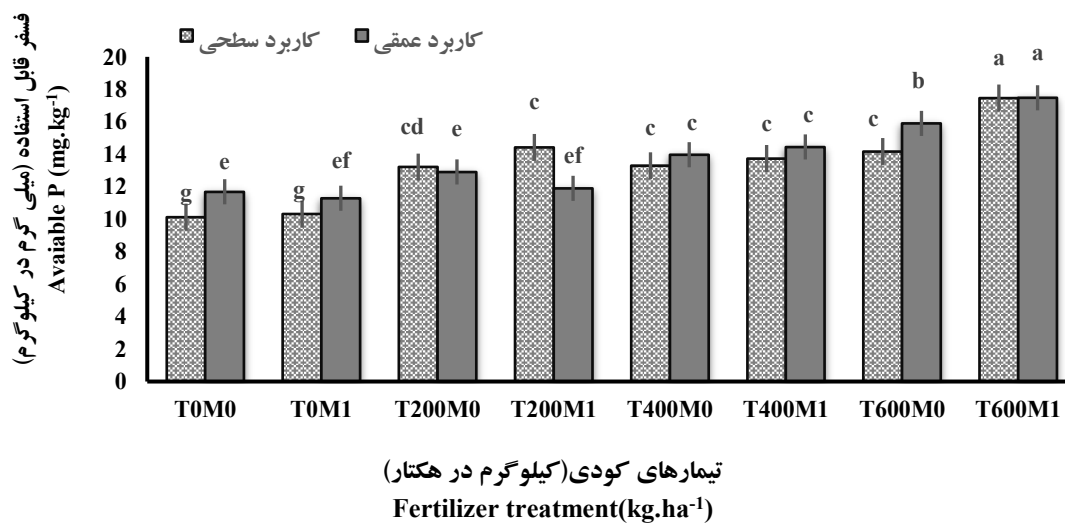
تنها ۲۰-۱۰ درصد از کودهای فسفره مورد استفاده به وسیله گیاه استفاده می‌شود و حدود ۸۰ درصد آن به‌صورت فسفر باقی‌مانده در خاک تجمع می‌یابد (Barrow, 1985). این تجمع می‌تواند در شکل آلی یا معدنی باشد که در درازمدت آزاد شوند و در دسترس گیاه قرار گیرند و یا در محصولات بعدی مورد استفاده قرار گیرند (Black, 2013). فسفر باقیمانده به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر اثرات متقابل سطح کاربرد کود، ماده آلی و عمق کاربرد قرار گرفت ($p < 0.05$) (جدول ۳). نتایج نشان داد در هر دو عمق کاربرد کود، در شرایط کاربرد و عدم کاربرد ماده آلی، فسفر باقیمانده به‌طور معنی‌داری در پاسخ به افزایش سطح کودی افزایش یافت. اما این افزایش در کاربرد سطحی کود بیشتر از کاربرد عمقی مشاهده شد (شکل ۲). میزان افزایش فسفر باقیمانده در تیمار ۶۰۰ کیلوگرم در هکتار با ماده آلی نسبت به تیمار بدون کود و ماده آلی ۵۴/۷ درصد بود که برای کاربرد عمقی ۳۲/۱ درصد مشاهده شد. از دلایل احتمالی این نتیجه این است که در کاربرد عمقی کود، احتمالاً نسبت کمتری از فسفر وارد فاز باقیمانده می‌شود و بیشتر در فازهای قابل دسترس‌تر تجمع می‌یابد. در نتایج به‌دست آمده توسط Shabazi et al. (2020b) نیز بیان شده است که با کاربرد ۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم کود شیمیایی فسفره میزان فسفر باقی‌مانده افزایش می‌یابد. با افزودن کود آلی به تمام سطوح کود سوپر فسفات تریپل، مقدار فسفر باقیمانده به‌طور معنی‌داری افزایش یافت (شکل ۲). در پژوهش Lemming et al. (2019) آمده است که استفاده طولانی مدت از کود آلی (کود گاوی) میزان فسفر باقی‌مانده را به‌طور قابل چشمگیری نسبت به سایر تیمارها افزایش داده است. به‌طور کلی کاربرد عمقی کود با افزایش بخش‌های در دسترس فراهمی فسفر را افزایش می‌دهد درحالی‌که کاربرد سطحی بخش‌های نسبتاً در دسترس و غیر قابل دسترس را افزایش داد.

جدول ۴. تجزیه واریانس فسفر قابل جذب در کاربرد سطحی و غیر سطحی کود

Table 4. variance analysis of available P in fertilizer surface and deep application

میانگین مربعات Mean square	درجه آزادی Freedom degree	منابع تغییرات Source of variation
60.78*	3	کود fertilizer
6.27*	1	ماده آلی Organic matter
0.36 ^{ns}	1	عمق کاربرد Application depth
0.78*	3	کود × ماده آلی × عمق کاربرد Fertilizer* Organic matter* Application depth
5.38	–	ضریب تغییرات Coefficient of variation

* و ns به ترتیب بیانگر اثر معنی دار در سطح احتمال پنج درصد و عدم اختلاف معنی دار است
* and ns indicate significant and non- significant effect at 5% probability level, respectively



شکل ۳. مقایسه دو عمق کاربرد کودی (سطحی و عمقی) بر فسفر قابل جذب در کاربرد سطوح مختلف کودی

T0: سطح کودی صفر، T200: سطح کودی ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار، T400: سطح کودی ۴۰۰ کیلوگرم در هکتار، T600: سطح کودی ۶۰۰ کیلوگرم در هکتار، M0: بدون ماده آلی، M1: دارای ماده آلی، D1: کاربرد سطحی کود، D2: کاربرد عمقی کود

(حروف متفاوت روی هر ستون، نشان دهنده اختلاف معنی دار تیمارها در سطح ۵ درصد آزمون LSD می باشد)

Fig 3. Comparative of fertilizer application depth (surface and deep) on available P in fertilizer different levels
T0: no fertilizer, T200: 200 kg superphosphate triple in hectare, T400: 400 kg superphosphate triple in hectare, T600: 600 kg superphosphate triple in hectare.

(Bars with similar letters are not significantly different (LSD, $p < 0.05$).

جدول ۵. ارتباط بین شکل‌های شیمیایی فسفر با فسفر قابل جذب

Table 5. the correlation between Pi fractions and available P

فسفر قابل استخراج با آب H ₂ O-P	فسفر قابل استخراج با بیکربنات سدیم NaHCO ₃ -P	فسفر قابل استخراج با سود NaOH-P	فسفر قابل استخراج با اسید کلریدریک HCl-P	فسفر باقیمانده Residual-P	فسفر قابل دسترس Available-P
فسفر قابل استخراج با آب H ₂ O-P	1	ns	-.54**	.48**	.34*
فسفر قابل استخراج با بیکربنات سدیم NaHCO ₃ -P	ns	1	ns	ns	-.52**
فسفر قابل استخراج با سود NaOH-P	ns	-.54**	1	ns	ns
فسفر قابل استخراج با اسید کلریدریک HCl-P	ns	-.46**	1	ns	.48**
فسفر باقیمانده Residual-P	ns	-.52**	ns	1	ns
فسفر قابل دسترس Available-P	ns	ns	ns	.48**	1

* و ** به ترتیب بیانگر اثر معنی‌دار در سطح احتمال پنج و یک درصد است.

* and ** indicate significant effect at 5% and 1% probability level, respectively

Zhang et al. (2004) نیز به همبستگی بین فسفر قابل جذب و فسفر قابل استخراج با اسید نیز اشاره شده است.

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که شکل‌های مختلف فسفر معدنی تحت تأثیر سطوح مختلف کودی قرار گرفتند به طوری که با افزایش سطح کودی اشکال فسفر معدنی افزایش یافتند. با این حال، روش کاربرد کود نقش تعیین‌کننده‌تری در افزایش قابلیت دسترسی فسفر داشت. کاربرد عمقی سوپر فسفات تریپل همراه با ماده آلی، فسفر را در فاز قابل دسترس برای گیاه قرار داد، در حالی که کاربرد سطحی منجر به تثبیت بیشتر فسفر و انتقال آن به اشکال غیرقابل دسترس شد. کاربرد عمقی کود در عمق توسعه ریشه گیاه دسترسی پسته به فسفر را افزایش داده و از تثبیت آن جلوگیری می‌کند، بنابراین، استفاده از روش کاربرد

ارتباط بین شکل‌های شیمیایی فسفر و فسفر قابل استفاده خاک آزمون همبستگی پیرسون جهت تعیین سهم هر یک از اشکال فسفر در افزایش فسفر قابل استفاده انجام شد (جدول ۵). فسفر قابل استفاده با اشکال فسفر معدنی همبستگی مثبت و منفی معنی‌داری در سطوح احتمال یک و پنج درصد نشان داد (جدول ۵). همبستگی مشاهده شده میان اشکال مختلف فسفر و فسفر قابل استفاده احتمالاً از وجود یک رابطه پویا بین آن‌ها در خاک حکایت دارد. همچنین نتایج ارائه شده در جدول (۵) بیانگر ارتباط مثبت و معنی‌دار بین فسفر قابل جذب و فسفر قابل استخراج با اسید کلریدریک (+۰/۴۸) ($p < 0.01$) داشت و با افزایش این شکل فسفر معدنی، میزان فسفر قابل جذب نیز افزایش یافت. در واقع افزایش فسفر قابل جذب خاک از طریق مصرف بیشتر کود، شرایط را برای رسوب بیشتر فسفر به شکل HCl-P فراهم کرده است. در مطالعه Verma et al. (2005) و

در انجام این پژوهش، حمایت مالی خاصی از مؤسسات عمومی، صنعتی و غیرانتفاعی دریافت نشده است.

عمقی (چالکودی) سوپر فسفات تریپل همراه با ماده آلی می تواند راهکاری مؤثر برای افزایش فراهمی فسفر قابل استفاده و حرکت به سمت مدیریت پایدار تغذیه در خاک های آهکی تحت کشت پسته باشد.

تضاد منافع

نویسندگان مقاله اذعان دارند هیچ گونه تضاد منافع با شخص، شرکت یا سازمانی برای این پژوهش ندارند.

تشکر و سپاسگزاری

References

منابع مورد استفاده

- Adnan, M., Fahad, S., Saleem, M.H., Lal, R., 2025. Sustainable phosphorus management in calcareous soils: problems and prospects. *J. Plant Nutr.* 1–22. DOI:10.1080/01904167.2025.2477269
- Barrow, N. J., 1985. Reaction of anions and cations with variable – charge soils. *J. Adv. Agron.* 38, 183–230
- Black, C. A., 2013. Soil fertility evaluation and control, CRC Press.
- Bouyoucos, G.J., 1962. Hydrometer method improved for making particle size analyses of soils. *Agron. J.* 54(5), 464–465. <http://dx.doi.org/10.2134/agronj1962.00021962005400050028x>
- Chen, M., Graedel, T.E., 2016. A half-century of global phosphorus flows, stocks, production, consumption, recycling, and environmental impacts. *J. Global Environ. Change.* 36, 139–152. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2015.12.005>
- Gatiboni, L.C., Schmitt, D.E., Tiecher, T., Veloso, M.G., dos Santos, D.R., Kaminski, J., Brunetto, G., 2021. Plant uptake of legacy phosphorus from soils without P fertilization. *Nutr. Cycling Agroecosyst.* 119, 139–151. <https://doi.org/10.1007/s10705-020-10109-2>
- Grossman, R.B., Reinsch, T.G., 2002. Bulk density and linear extensibility. In: Dane, J.H., Topp, G.C. (Eds.), *Methods of Soil Analysis, Part 4. Physical Methods*. Soil Sci. Soc. Am. J. Madison, WI, pp. 202–228.
- Hao, L., Zhang, J., Christie, P., Li, X., 2008. Response of two maize inbred lines with contrasting phosphorus efficiency and root morphology to mycorrhizal colonization at different soil phosphorus supply levels. *J. Plant Nutr.* 31(6), 1059–1073.
- Hedley, M.J., Stewart, J.W.B., Chauhan, B.S., 1982. Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 46(5), 970–976. <https://doi.org/10.2136/sssaj1982.03615995004600050017x>
- Heidari, A., Alizadeh, H.H.A., Yazdanpanah, A.R., Parian, J.A., 2017. The effect of different tillage methods and fertilizer application on soil physical properties and corn yield. *J. Water and Soil Sci.* 20(78), 103–112. Doi:10.18869/acadpub.jstnar.20.78.103 (In Persian)
- Hooker, M.L., Peterson, G.A., Sander, D.H., Daigger, L.A., 1980. Phosphate fractions in calcareous soils as altered by time and amounts of added phosphate. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44(2), 269–277.
- Lemming, C., Oberson, A., Magid, J., Bruun, S., Scheutz, C., Frossard, E., Jensen, L. S., 2019. Residual phosphorus availability after long-term soil application of organic waste. *Agric. Ecosyst. Environ.* 270, 65–75.
- Liu, C., Yan, H., Wang, W., Han, R., Li, Z., Lin, X., Wang, D., 2023. Layered application of phosphate fertilizer increased winter wheat yield by promoting root proliferation and phosphorus accumulation. *J. Soil Tillage Res.* 225, 105546. <https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105546>
- Mao, Y., Hu, W., Li, Y., Li, Y., Lei, B., Zheng, Y., 2023. Long-term cattle manure addition enhances soil-available phosphorus fractions in subtropical open-field rotated vegetable systems. *J. Front. Plant Sci.* 14:1138207. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1138207>
- Mohseni, A., Mirseyed, H.H., Abbasi, F., 2013. Comparison of Fertilization with Surface Broadcast Fertilizer Method in Water, Fertilizer Use Efficiency, Yield, Component Yield of Corn and Losses of Nitrogen. *J. Water and Soil* 26(5), 1181–1189. <https://doi.org/10.22067/jsw.v139i10.17046> (In Persian with English abstract)
- Mou, X.M., Wu, Y., Niu, Z., Jia, B., Guan, Z.H., Chen, J., Li, H., Cui, H., Kuzyakov, Y., Li, X.G., 2020. Soil phosphorus accumulation changes with decreasing temperature along a 2300 m altitude gradient. *Agric. Ecosyst. Environ.* 301, 107050. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.107050>
- Murphy, J.A.M.E.S., Riley, J.P., 1962. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Anal. Chim. Acta.* 27, 31–36. [https://doi.org/10.1016/S0003-2670\(00\)88444-5](https://doi.org/10.1016/S0003-2670(00)88444-5)
- Rhoades, J.D., 1996. Salinity: Electrical Conductivity and Total Dissolved Solids. In: Sparks, R.L. (Eds.), *Methods for Soil Analysis, Part 3. Chemical Methods*, Soil Sci. Soc. Am. J. Madison, pp.417–435.

- Sample, E.C., Soper, R.J., Racz, G.J., 1980. Reactions of phosphate fertilizers in soils. ASA, CSSA, and SSSA Books The role of phosphorus in agriculture, pp.263–310. 10.2134/1980.roleofphosphorus.c12
- Salardini, A., 2009. soil fertility, Tehran university press, Tehran. (In Persian)
- Schwartz, R. C., Dao, T. H., 2005. Phosphorus extractability of soils amended with stockpiled and composted cattle manure. J. Environ. Qual. 34(3), 970–978.
- Shahbazi, K., Romić, M., Ferguson, R., Suvannang, N., 2020a. Standard operating procedure for soil calcium carbonate equivalent Volumetric Calcimeter method. FAO,1–13.
- Shahbazi, F., Hosseinpour, A. R., Motaghian, H. R., 2020b. The interaction between P fertilizer and vermicompost on the availability, fractions of P and (*Zea mays* L.) growth indices in a calcareous soil. J of Water and Soil Science 24(1), 57–68. (In Persian with English abstract)
- Shahbazi, K. and Besharati, H., 2013. Overview of agricultural soil fertility status of Iran. J. Land Management 1(1), 1–15. 10.22092/lmj.2013.100072. (In Persian).
- Shahriaripour, R., 2022. Investigation of chemical forms of phosphorus for soil phosphorus management in pistachio orchards. Agricultural Engineering 45(2), 167–181 (In Persian with English abstract)
- Sparks, D.L., Page, A.L., Helmke, P.A. and Loeppert, R.H., 1996. Methods of soil analysis, part 3: Chemical methods. In: Wiley, J., Sons.(Eds), Soil Sci Soc of Am, pp. 1–1390.
- Sui, Y., Thompson, M.L. and Shang, C., 1999. Fractionation of phosphorus in a Mollisol amended with biosolids. Soil Sci. Soc. Am. J 63(5), 1174–1180.
- Thomas, G.W., 1996. Soil pH and Soil Acidity. In: Sparks, D.L. (Eds.), Methods of Soil Analysis, Part 3. Chemical Methods, Soil Sci. Soc. Am. J. Madison, Wisconsin, pp. 475–490.
- Verma, S., Subehia, S.K., Sharma, S.P., 2005. Phosphorus fractions in an acid soil continuously fertilized with mineral and organic fertilizers. Biology and fertility of Soils 41(4), 295–300. DOI:10.1007/s00374-004-0810-y
- Walkley, A., Black, I.A., 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. J of Soil Sci. 37(1), 29–38. <http://dx.doi.org/10.1097/00010694-193401000-00003>
- Zhang, F., Kang, S., Zhang, J., Zhang, R., Li, F., 2004. "Nitrogen fertilization on uptake of soil inorganic phosphorus fractions in the wheat root zone" J. Soil Sci. Soc. Am. 68, 1890–1895.